

ЕКОЛОГІЯ ФІТОСФЕРИ

УДК 504.064.2

Т. І. Кривомаз, Д. В. Максименко
 Київський національний університет
 будівництва та архітектури, м. Київ

**МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА
 МЕТАЛАМИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЇХ КОНЦЕНТРАЦІЇ В МІКСОМІЦЕТІ *FULIGO*
*SEPTICA***

В результаті проведеного аналізу вмісту 14 металів в досліджених зразках, з'ясувалось, що в еталіях *Fuligo septica* була зареєстрована найбільша концентрація Ca, Mn, Zn, в субстратах – Ca, Mg, Mn, у ґрунті – Ca, Al, Fe, в рухомих формах ґрунту – Ca, Mn, Mg, у дощовій воді – Ca, Mg, Cu, у повітрі – Ca та Mg. При порівнянні зразків *Fuligo septica* з України та Франції шляхом факторного аналізу виявлено, що особливості накопичення елементів залежать від трьох факторів: 1) концентрацій Pb та Cr; 2) концентрації Mn, Bi, As; 3) від локалізації та концентрації Cd, Zn, Ni в міксоміцеті. На гіперакумулятивні властивості *F. septica* стосовно Zn впливають концентрації цього металу в субстраті, ґрунті та його рухомих формах. Закономірності зв'язків переходу окремих металів по ланцюгам екосистеми описуються рівнянням лінійної регресії: $C_m(Mn)=10,04C_{soil}-47,42C_{SMF}$; $C_m(Pb)=0,21C_{soil}-1066,7C_{rw}$; $C_m(Cd)=2,67C_{soil}$, де C_m – концентрація металу в міксоміцеті, C_{sub} – в субстраті, C_{soil} – в ґрунті, C_{SMF} – в рухомих формах ґрунту, C_{rw} – в дощовій воді.

Ключові слова: екологічна безпека, міксоміцети, метали, математичне моделювання

В результате анализа содержания 14 металлов в исследованных образцах выяснилось, что в еталіях *Fuligo septica* была зарегистрирована наибольшая концентрация Ca, Mn, Zn, в субстратах – Ca, Mg, Mn, в почве – Ca, Al, Fe, в подвижных формах почвы – Ca, Mn, Mg, в дождевой воде – Ca, Mg, Cu, в воздухе – Ca и Mg. При сравнении образцов *Fuligo septica* из Украины и Франции путем факторного анализа выявлено, что особенности накопления элементов зависят от трех факторов: 1) концентраций Pb и Cr; 2) концентрации Mn, Bi, As; 3) от локализации и концентрации Cd, Zn, Ni в миксомицете. На гиперакумулятивные свойства *F. septica* по отношению к Zn влияют концентрации этого металла в субстрате, почве и его подвижных формах. Закономерности связей перехода отдельных металлов по цепям экосистемы описываются уравнением линейной регрессии: $C_m(Mn)=10,04C_{soil}-47,42C_{SMF}$; $C_m(Pb)=0,21C_{soil}-1066,7C_{rw}$; $C_m(Cd)=2,67C_{soil}$, где C_m – концентрация металла в миксомицете, C_{sub} – в субстрате, C_{soil} – в почве, C_{SMF} – в подвижных формах почвы, C_{rw} – в дождевой воде.

Ключевые слова: экологическая безопасность, микромикет, металлы, математическое моделирование

An analysis of the content of 14 metals in the samples revealed that aethalia *Fuligo septica* was registered Ca largest concentration, Mn, Zn, in substrates – Ca, Mg, Mn, in soil – Ca, Al, Fe, in the movable forms of soil – Ca, Mn, Mg, rain water – Ca, Mg, Cu, air – Ca and Mg. In comparing the samples *Fuligo septica* from Ukraine and France by factor analysis showed that especially the accumulation of elements depends on three factors: 1) the

concentrations of Pb and Cr; 2) the concentration of Mn, Bi, As; 3) the location and concentration of Cd, Zn, Ni in Myxomycetes. On hyperaccumulation *F. septica* properties with respect to impact Zn concentration of this metal in the substratum, and movable soil forms. Patterns of connections of transition metals by the individual circuits of the ecosystem are described by linear regression: $C_m(\text{Mn})=10,04C_{\text{soil}}-47,42C_{\text{SMF}}$; $C_m(\text{Pb})=0,21C_{\text{soil}}-1066,7C_{\text{rw}}$; $C_m(\text{Cd})=2,67C_{\text{soil}}$, where C_m – metal concentration in the slime molds, C_{sub} – in the substratum, C_{soil} – in soil, C_{SMF} – in movable forms soil, C_{rw} – in rainwater.

Keywords: ecological safety, micromyceta, metals, mathematical modeling

Актуальність і постановка проблеми. Вирішення проблеми забруднення важкими металами навколишнього середовища є одним з важливих завдань екобезпеки. Живі організми відіграють важливу роль в перерозподілі металів, виступаючи в ролі своєрідних геохімічних бар'єрів та в якості накопичувачів хімічних елементів. Зокрема, міксоміцети, завдяки тісному зв'язку з ґрунтом, рослинними залишками та обмеженій території переміщення, відображають фактичний рівень забруднення екосистем і можуть виступати у ролі біоіндикаторів важких металів у середовищі [1]. Незважаючи на актуальність теми та потенціал міксоміцетів до акумуляції важких металів, існує всього кілька публікацій, присвячених дослідженню вмісту у польових зразках міксоміцетів. В більшості досліджень [4, 5, 7] спостерігався аномально високий вміст цинку в еталіях *Fuligo septica* (4000-20000 мг/кг) і значний вміст заліза, кадмію та інших металів [4]. Згодом з'ясувалось, що гіперакумуляція Zn пов'язана з синтезом *F. septica* жовтого пігменту фулігорубіну А, який утворює хелатні комплекси з Zn, переводячи його в неактивну форму [2]. Проте, не були встановлені шляхи надходження металів, оскільки згадані дослідження не виявили кореляційних зв'язків між концентраціями металів в субстратах та міксоміцетах [7]. З'ясування особливостей кругообігу важких металів в природньому середовищі сприятиме розвитку методів моніторингу антропогенного впливу та покращенню засобів управління у сфері екологічної безпеки.

Мета дослідження. Визначити зв'язки між концентраціями металів в міксоміцеті *Fuligo septica* та в його субстраті, ґрунті, рухомих формах ґрунту, дощовій воді та повітрі.

Матеріали та методи. Матеріалом для дослідження стали зразки плодових тіл (еталії) міксоміцету *Fuligo septica*, субстрати (відмерла деревина, кора, опале листя), ґрунт, рухомі форми ґрунту, а також проби дощової води та повітря. Вісім зразків було відібрано 04.09.2015 на території Національного музею народної архітектури та побуту України у с.Пирогів, а два зразки – на околицях с. Анжа у французьких Альпах поблизу Гренобля 10.08.2016 та 19.08.2016. Субстратами були кора та листя поваленого стовбура *Populus tremula*, деревина пня та стовбура *Picea abies*. Проби повітря відбирались на фільтрувальний папір впродовж 10 днів в чашки Петрі. Проби дощової води збирались в пластикові контейнери під час випадання опадів та зберігались в холодильнику до проведення досліджень. Особливості морфології міксоміцетів визначали з використанням методів трансмісійної світлової мікроскопії [3]. Дослідження вмісту хімічних елементів здійснювалось методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою [6]. Математичну обробку кількісних даних здійснювали з використанням методів математичного аналізу, моделі і графічні зображення, за допомогою програми Statistica. Дослідження проводилось на кафедрі охорони праці та навколишнього середовища факультету інженерних систем та екології Київського національного університету будівництва і архітектури.

Результати досліджень. В результаті проведеного аналізу вмісту 14 металів в досліджених зразках, з'ясувалось, що в еталіях *Fuligo septica* була зареєстрована найбільша концентрація Ca, Mn, Zn, в субстратах – Ca, Mg, Mn, у ґрунті – Ca, Al, Fe, в рухомих формах ґрунту – Ca, Mn, Mg, у дощовій воді – Ca, Mg, Cu, у повітрі – Ca та Mg (табл. 1).

Концентрації металів в досліджених зразках

Метали	Середні значення концентрацій елементів					
	міксоміцет, мкг/г	субстрат, мкг/г	грунт, мкг/г	рухомі форми, мкг/г	дощова вода, мг/дм ³	повітря, мкг/см ²
Al	7,55	94,75	1915	23,85	0,03	0,14
As	2,36	0,13	0,05	0,03	--	--
Bi	0,88	0,02	0,06	0,002	--	--
Ca	78801,1	3100,67	12400	2393,89	11,34	57,73
Cd	0,41	0,11	0,06	0,12	--	--
Cr	4,57	0,89	1,14	7,64	0,005	--
Cu	2,97	1,19	2,25	0,11	0,35	0,005
Fe	65,72	47,88	1055	6,28	0,03	0,19
Hg	0,003	0,003	0,003	--	--	--
Mg	784,33	186,47	556,16	152,85	0,45	10,51
Mn	1794,04	167,44	297,48	55,37	0,014	0,006
Ni	0,07	2,07	0,33	5,86	0,003	--
Pb	0,77	0,28	2,31	5,38	0,005	0,0004
Zn	1751,43	21,39	6,67	22,29	0,2	0,01

В попередніх дослідженнях спостерігались надзвичайні акумулятивні властивості *F. septica* стосовно цинку, проте було незрозуміло, звідки міксоміцет бере цей метал. Для з'ясування цього питання було застосовано факторний аналіз за критерієм Кайзера з урахуванням індексу навантаження, де зважена відстань розраховувалась за методом найменших квадратів. Виявилось, що на гіперакумулятивні властивості *F. septica* стосовно Zn найбільше впливають концентрації цього металу в ґрунті та субстраті, а також в рухомих формах ґрунту. Зв'язок між концентраціями в субстраті, ґрунті та міксоміцеті не описується простим лінійним рівнянням. Ця залежність наочно продемонстрована на контурних діаграмах (рис. 1), де колір ліній вказує на концентрацію в міксоміцеті, а за їх конфігурацією можна визначити залежність від концентрацій в субстраті, ґрунті та його рухомих формах.

Факторний аналіз показує, що особливості накопичення елементів у 10 зразках *F. septica* на різних субстратах з різних локалітетів коректно описуються трьома факторами: 1) залежить від концентрацій Pb, Cr; 2) від концентрації Mn, Bi, As; 3) від локалізації та концентрації Cd, Zn, Ni в міксоміцеті (рис. 2).

За допомогою критерію Вальда-Вольфовиця проведено порівняння середнього значення концентрацій металів у 8 зразках *F. septica* з України та двох зразках з Франції. З'ясувалося, що накопичення токсичних металів Cd, Zn, Ni, Cr, As в міксоміцетах значно відрізняється, в залежності від місцезнаходження зразків (рівень значимості $p < 0.05$). Для всіх згаданих елементів, крім As, середні концентрації вищі у зразках з Франції, ніж у зразках з України. Таким чином виявлений стохастичний зв'язок між місцезнаходженням *F. septica* та концентраціями Cd, Zn, Ni, Cr, As в його еталіях. Цей зв'язок також підтверджується значеннями коефіцієнтів кореляції Кенделла та Спірмена (ймовірність 95%).

Слід зауважити, що не для всіх металів виявились однакові тенденції залежностей накопичення. Зокрема, вміст марганцю в *F. septica* суттєво залежить від концентрації цього металу в ґрунті та його рухомих формах (рис. 3). Про значимість впливу свідчить частинний коефіцієнт кореляції, і, в даному випадку, для ґрунту він дорівнює 91%. Напівчастинний коефіцієнт кореляції описує взаємовплив факторів між собою, тобто чим менше його значення, тим фактор більш відокремлений і незалежний від інших факторів.

Як видно з результатів статистичної обробки, найбільш незалежним і відокремленим фактором впливу на концентрацію Mn в міксоміцеті є величина концентрації цього елемента в рухомих формах ґрунту. Графічне представлення моделі

залежності концентрацій Mn в еталіях *F. septica* від вмісту елементу в ґрунті та його рухомих формах наочно демонструє фактичні та прогнозовані значення концентрації металу в міксоміцеті. Довірча область містить 95% значень і всього кілька показників не вписуються в цю модель.

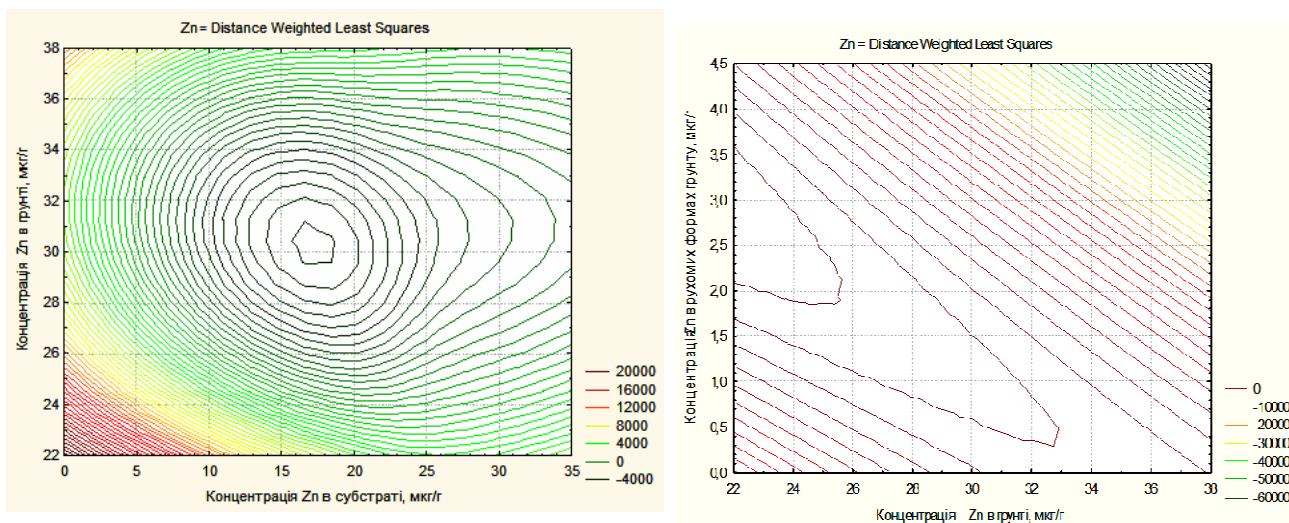


Рис. 1. Контурні діаграми залежності концентрації цинку в *Fuligo septica* від субстрату та ґрунту, ґрунту та його рухомих форм

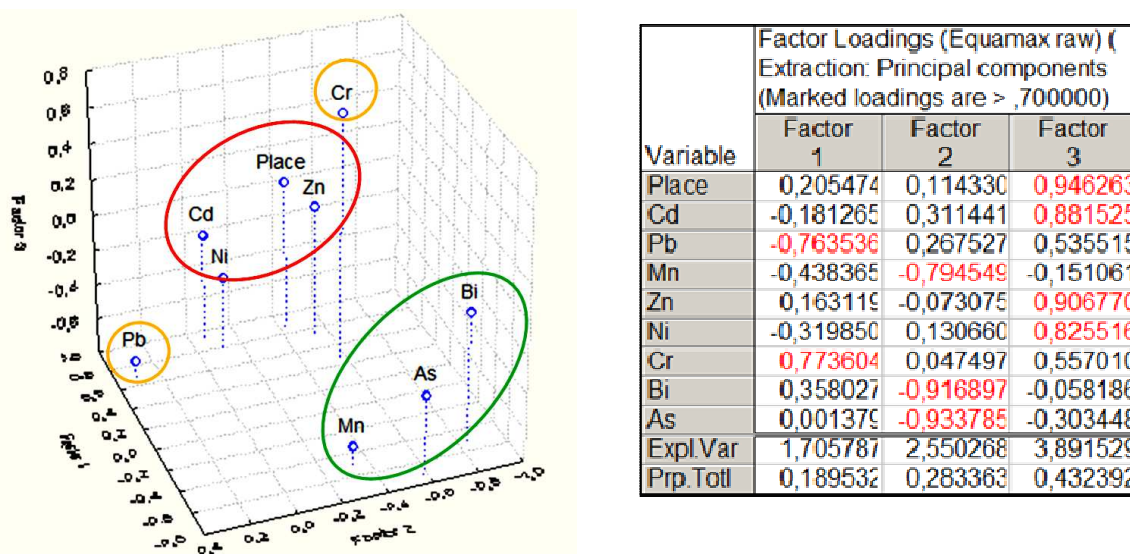


Рис. 2. Моделювання акумуляції металів *Fuligo septica* в залежності від субстрату та місцезнаходженням методом багатомірного масштабування

Залежність концентрації Mn в міксоміцеті від концентрації цього металу в ґрунті та його рухомих формах описується рівнянням лінійної регресії:

$$C_m(\text{Mn})=10,04C_{\text{soil}}-47,42C_{\text{SMF}} , \quad (1)$$

де C_m – концентрація металу в міксоміцеті, а C_{soil} – в ґрунті, C_{SMF} – в рухомих формах ґрунту.

Модель лінійної регресії накопичення свинцю в еталіях *F. septica* в залежності від концентрації цього металу в ґрунті та дощовій воді представлена на рис. 4. Частинний коефіцієнт кореляції для ґрунту дорівнює 79%, а для дощу – 78%. Напівчастинний коефіцієнт кореляції свідчить про більшу відокремленість фактору дощу (70%), проте для

грунту він не набагато менший (72%), тобто в даному випадку ці фактори практично еквівалентні і суттєво взаємопов'язані. Довірча область містить 95% всіх значень.

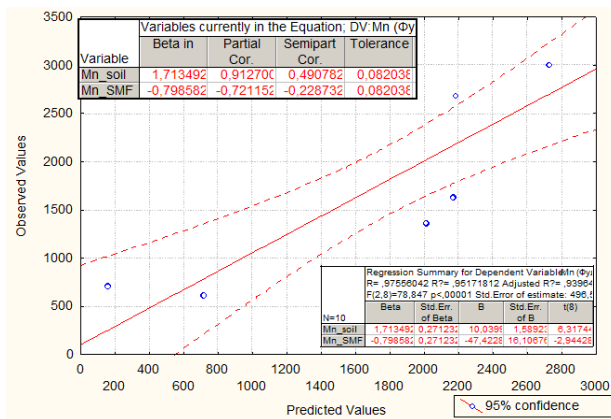


Рис. 3. Залежність концентрації Mn в *Fuligo septica* від концентрації цього металу в ґрунті та його рухомих формах

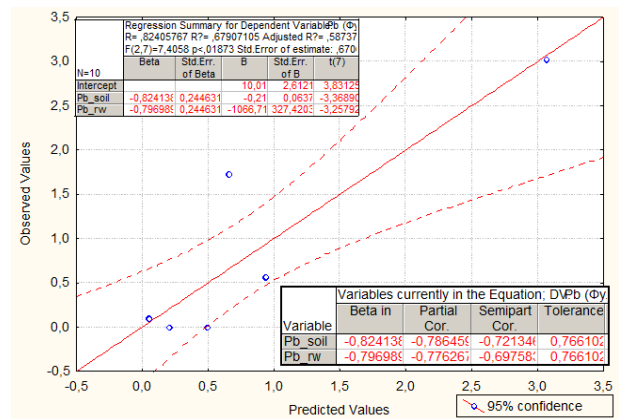


Рис. 4. Залежність концентрації свинцю в *Fuligo septica* від концентрації цього металу в ґрунті та дощовій воді

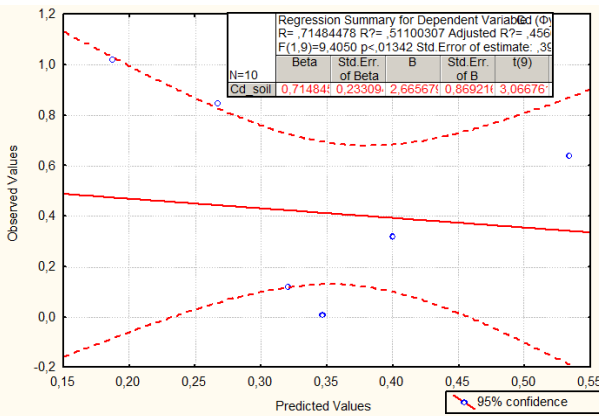


Рис. 5. Залежність концентрації кадмію в *Fuligo septica* від концентрації цього металу в ґрунті

Вміст свинцю в *F. septica* суттєво залежить від концентрації цього металу в ґрунті та дощовій воді, що описується наступною формулою (моделлю):

$$C_m(\text{Pb}) = 0,21C_{\text{soil}} - 1066,7C_{\text{rw}}, \quad (2)$$

де C_m – концентрація металу в міксоміцеті, а C_{soil} – в ґрунті, C_{rw} – в дощовій воді.

Вміст кадмію в еталіях *F. septica* залежить тільки від концентрації цього металу в ґрунті (рис. 5), що описується наступною формулою (моделлю):

$$C_m(\text{Cd}) = 2,67C_{\text{soil}}, \quad (3)$$

Очевидно, що міксоміцет *Fuligo septica* накопичує токсичні метали, проте шляхи надходження кожного елемента носять специфічний характер. Математичне моделювання є ефективним методом, що обґрунтовано та наочно демонструє шляхи надходження елементів та допомагає з'ясувати механізми їх біотрансформації в ланцюгах екосистем. Проте, необхідні подальші дослідження для уточнення отриманих результатів та розширення інформації щодо біоаккумулятивних та біоремедіаційних властивостей різних видів міксоміцетів та інших живих організмів.

Обговорення та висновки. Використання запропонованих моделей дозволяє спрогнозувати забруднення середовища важкими металами за вмістом елементів в міксоміцетах. В результаті дослідження зроблені наступні висновки:

1 Виявлено, що в досліджених зразках *Fuligo septica* найбільша концентрація Ca, Mn, Zn, в субстратах – Ca, Mg, Mn, у ґрунті – Ca, Al, Fe, в рухомих формах ґрунту – Ca, Mn, Mg, у дощовій воді – Ca, Mg, Cu, у повітрі – Ca та Mg.

2 При порівнянні зразків *Fuligo septica* з України та Франції шляхом факторного аналізу з'ясовано, що особливості накопичення елементів залежать від трьох факторів: 1) від концентрацій Pb та Cr; 2) від концентрації Mn, Bi, As; 3) від локалізації та концентрації Cd, Zn, Ni в міксоміцеті.

3 На гіперакумулятивні властивості *F. septica* стосовно Zn впливають концентрації цього металу в субстраті, ґрунті та його рухомих формах.

4 Закономірності зв'язків переходу окремих металів по ланцюгам екосистеми описуються рівнянням лінійної регресії: $C_m(\text{Mn})=10,04C_{\text{soil}}-47,42C_{\text{SMF}}$; $C_m(\text{Pb})=0,21C_{\text{soil}}-1066,7C_{\text{rw}}$; $C_m(\text{Cd})=2,67C_{\text{soil}}$, де C_m – концентрація металу в міксоміцеті, C_{sub} – в субстраті, C_{soil} – в ґрунті, C_{SMF} – в рухомих формах ґрунту, C_{rw} – в дощовій воді.

Література

1 Кривомаз Т. І. Перший аналіз вмісту важких металів та інших елементів в плодкових тілах нівальних міксоміцетів Карпат [Текст] / Т. І. Кривомаз, І. М. Андрусишина // Екологічна безпека та природокористування. – 2015. – № 4. – С. 20-31.

2 Latowski D. *Fuligo septica*, as a new model organism in studies on interaction between metal ions and living cells [Text] / D. Latowski, A. Lesiak, E. Jarosz-Krzeminska, K. Strzalka // Metal Ions in Biology and Medicine and Medicine. 2008. – N 10. – P. 204–209.

3 Poulain M. Les Мухомycètes [Text] / M. Poulain, M. Meyer, J. Bozonnet. – Delémont: FMBDS, 2011. – 1119 p.

4 Setälä A. High metal contents found in *Fuligo septica* L. Wiggers and some other slime molds (Мухомycetes) [Text] / A. Setälä, P. Nuorteva // Karstenia. 1989. – V. 29. – N 1. – P. 37-44.

5 Stijve T. Accumulation of various metals by *Fuligo septica* (L.) Wiggers and by some other slime molds (myxomycetes) [Text] / T. Stijve, D. Andrey // Australasian Mycologist. 1999. – V. 18. – N 2. – P. 23–26.

6 Tüzen M. Determination of heavy metals in soil, mushroom and plant samples by atomic absorption spectrometry [Text] / M. Tüzen // Microchem J. 2003. – N 74. – P. 289–297.

7 Zhulidov D.A. Zinc Accumulation by the Slime Mold *Fuligo septica* (L.) Wiggers in the Former Soviet Union and North Korea [Text] / D.A. Zhulidov, R.D. Robarts, A.V. Zhulidov, O.V. Zhulidova, D.A. Markelov, V.A. Rusanov, J.V. Headley // Journal of Environmental Quality. 2002. – N 31. – P. 1038–1042.

© Т. І. Кривомаз,
Д. В. Максименко

Надійшла до редакції 18 жовтня 2016 р.
Рекомендувала до друку
докт. техн. наук О. С. Волошкіна

УДК 504.61:622.32+502.211:582

Н. І. Глібовицька, Х. Б. Караванович
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СТАН ДЕРЕВНИХ РОСЛИН В УМОВАХ НАФТОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ

Проаналізовано характерні реакції рослинних організмів у відповідь на контамінацію навколишнього середовища нафтою та нафтопродуктами. Виявлено погіршення функціонального стану ряду листяних деревних порід в умовах нафтового забруднення, що проявляється у зниженні ростових процесів та появі масових пошкоджень асиміляційних органів. Встановлено, що горіх волоський є стійким до контамінації поллютантами і може використовуватися у якості фіторемедіанта для рекультивациі забруднених нафтою територій. Гірकोкаштан звичайний, клен ясенелистий, липа серцелиста, липа широколиста, береза повисла та сосна звичайна є чутливими до